

PENGARUH KOREKSI BIAS IONOSFER TERHADAP HASIL KOORDINAT PENGAMATAN GPS *SINGLE FREQUENCY* MENGGUNAKAN MODEL *KLOBUCHAR*

Ririn Wuri Rahayu^{*1}, Mokhamad Nur Cahyadi², Buldan Muslim³

^{1,2}Department of Geomatics Engineering, FTSLK-ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

³Space Science Center, LAPAN, Jl. Dr. Junjuran 133 Bandung, Indonesia

e-mail: ririn14@mhs.geodesy.its.ac.id

Abstrak

Sinyal satelit GPS dipengaruhi oleh beberapa jenis faktor kesalahan, di antaranya penundaan sinyal GPS oleh ionosfer. Pada GPS *single frequency* bias ini dapat dikoreksi menggunakan Model Klobuchar, yang memperkirakan penundaan waktu ionosfer hingga 50% atau lebih. Untuk menggunakan model Klobuchar membutuhkan delapan koefisien Klobuchar (α_n , β_n , untuk $n = 1, 2, 3, 4$) dan disediakan melalui pesan navigasi. Koefisien *Klobuchar* didapatkan dari perhitungan data pengamatan GPS yang terdistribusi di seluruh dunia dengan metode yang tidak terpublikasi. Dalam penelitian ini, satu set koefisien *Klobuchar* dihitung menggunakan data pengamatan GPS lokal sehari sebelumnya dan digunakan sebagai parameter navigasi pada hari selanjutnya untuk menentukan koordinat titik pengamat. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak RTKLIB untuk mengolah hasil koordinat. Hasil penelitian ini didapatkan nilai koordinat meningkat sebesar 26,015% dengan menggunakan koefisien lokal.

Kata kunci : Bias Ionosfer, GPS *Single Frequency*, Model *Klobuchar*, RTKLIB

PENDAHULUAN

Bias ionosfer terjadi ketika sinyal GPS dibiaskan oleh elektron bebas di ionosfer, dan jumlah kesalahan yang dihasilkan oleh bias ionosfer bergantung pada lokasi pengamat, waktu, dan aktivitas matahari. Bias ionosfer terjadi dalam ukuran sentimeter sampai meter selama aktivitas matahari sedang, namun dapat terjadi hingga lebih dari 150 m selama aktivitas matahari yang parah (Komjathy dkk. 2002). Pada Mei 2000, pemerintah Amerika mengumumkan bahwa kesalahan akibat bias ionosfer dianggap sebagai faktor kesalahan terbesar yang mempengaruhi akurasi posisi GPS. Karena bias ionosfer mengakibatkan penurunan akurasi GPS pada *Standard Positioning Service* (Yuan dkk. 2007).

Untuk menghilangkan kesalahan akibat bias ionosfer, perlu dilakukan koreksi bias ionosfer. GPS *dual frequency* yang menerima frekuensi L1 dan L2 dapat menghilangkan sebagian besar kesalahan ionosfer melalui kombinasi bebas ionosfer. Namun, biaya penggunaan GPS *dual frequency* relatif mahal, dan karena itu jika penentuan posisi tidak memerlukan akurasi observasi dalam satuan milimeter hingga centimeter, GPS *single frequency* umumnya

digunakan. Tetapi, karena GPS *single frequency* hanya menerima satu frekuensi (L1), maka kombinasi bebas ionosfer tidak dapat digunakan dalam pengolahan data GPS *single frequency*.

Sampai saat ini, untuk mereduksi kesalahan bias ionosfer pada GPS *single frequency* umumnya menggunakan pendekatan model atau algoritma. Diantaranya, model *Klobuchar*, Bent, IRI, ICED dan FAIM. Model *Klobuchar* adalah model yang paling banyak digunakan, karena strukturnya sederhana dan perhitungannya mudah (Yuan dkk. 2008). Untuk menggunakan model *Klobuchar*, diperlukan delapan koefisien *Klobuchar*, α_n , β_n ($n = 1, 2, 3, 4$) yang terdapat pada *Broadcast Messages*. Menurut Schaer (2003) dalam Yuan (2008), Pusat Penentuan Orbit di Eropa (CODE) memberikan serangkaian waktu model koefisien *Klobuchar*, yang didapat dari penggabungan data pengamatan GPS IGS terdistribusi di seluruh dunia dengan metode yang tidak dipublikasikan. Penelitian Hernandez pada tahun 2003 menunjukkan bahwa kombinasi data pengamatan GPS dari banyak stasiun pengamatan internasional GNSS (IGS) yang disebarkan secara global dan beberapa stasiun GPS jaringan regional. Hal tersebut yang mendasari penelitian Yuan (2008) untuk mempelajari koefisien *Klobuchar* dan

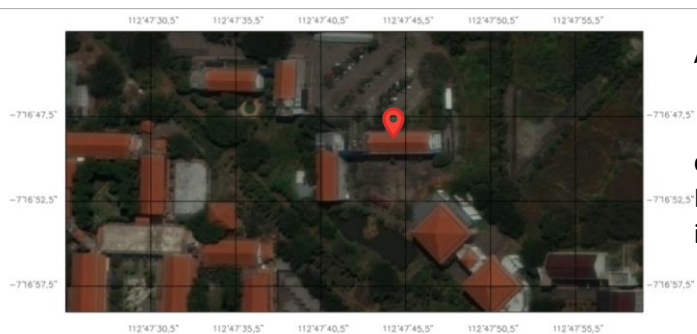
mengembangkan sebuah metode untuk meningkatkan akurasi model *Klobuchar*.

Berdasarkan hasil penelitian Yuan (2008), didapatkan kesimpulan bahwa akurasi posisi pengamatan GPS *single frequency* dapat meningkat dengan menggunakan koefisien yang telah dikembangkan menggunakan model *Klobuchar*. Penelitian ini terinspirasi dari penelitian Yuan (2008), dengan menggunakan metode yang telah dikembangkan dalam penelitian tersebut. Penelitian ini akan melakukan perhitungan koefisien *Klobuchar* dengan menggunakan data pengamatan GPS geodetik lokal, koefisien hasil perhitungan akan disebut sebagai Koefisien *Klobuchar* lokal dan koefisien dari *Broadcast Messages* akan disebut sebagai Koefisien *Klobuchar* global. Kemudian melakukan perhitungan posisi koordinat pada titik pengamatan GPS *single frequency* menggunakan RTKLIB dan perubahan akurasi yang dihasilkan koefisien *Klobuchar* lokal.

METODE

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini adalah di titik *Benchmark* Departemen Teknik Geomatika ITS dan titik *Benchmark* Rektorat ITS dengan koordinat geografis 7° 16' 47,46" LS - 112° 47' 42" BT dan 7° 16' 55,2" LS - 112° 47' 39" BT.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan melalui beberapa tahapan pengolahan data berikut :

1. Permodelan *Klobuchar* lokal

- a. Perhitungan nilai koordinat satelit dari data Navigasi, pada tahap ini dilakukan

dengan menggunakan program *fortan rdeph.f* dengan interpolasi data setiap 30 detik.

- b. Perhitungan sudut elevasi, Azimuth dan koordinat IPP satelit.

$$r_s = \sin \phi \cos \theta r_x + \sin \phi \sin \theta r_y - \cos \phi r_z \quad (1)$$

$$r_E = -\sin \theta r_x + \cos \theta r_y \quad (2)$$

$$r_z = \cos \phi \cos \theta r_x + \cos \phi \sin \theta r_y + \sin \phi r_z \quad (3)$$

$$r = \sqrt{r_s^2 + r_E^2 + r_z^2} \quad (4)$$

$$El = \sin^{-1}(r_z / r) \quad (5)$$

$$Az = \tan^{-1}(-r_E / r_s) \quad (6)$$

Keterangan:

r_s, r_E, r_z = jarak vektor koordinat satelit dan pengamat

ϕ, θ = Koordinat pengamat

El = sudut elevasi

Az = Sudut Azimut

- c. Perhitungan Bias ionosfer (*Tiono*)

Parameter yang digunakan untuk menghitung bias ionosfer adalah:

- (i) Koordinat posisi satelit (X,Y,Z)
- (ii) Koefisien *Klobuchar* pada file *rinex* navigasi
- (iii) Lintang geomagnetik pada *ionospheric pierce point* dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$\varphi_m = \varphi_i + 0,064 \cos (\lambda_i - 1.167) \quad (7)$$

dimana φ_i dan λ_i adalah lintang dan bujur pada *ionospheric pierce point*. Koefisien *Klobuchar* merupakan 8 buah nilai yang disebut koefisien *ion*

alpha ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) dan *ion beta* ($\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$) pada *Broadcast Message*. Koefisien *ion alpha* digunakan untuk menghitung amplitudo (AMP) dan Koefisien *ion beta* digunakan untuk menghitung periode (PER), dengan rumus:

$$AMP = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \varphi_m^n \quad (8)$$

$$PER = \sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi_m^n \quad (9)$$

dimana φ_m adalah lintang geomagnetik. Selanjutnya nilai AMP dan PER digunakan untuk menghitung nilai bias ionosfer (T_{iono}), dimana menggunakan persamaan berikut:

$$T_{iono} = \begin{cases} F * \left[DC + AMP * \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right], & |x| < 1.57 \\ F * DC, & |x| \geq 1.57 \end{cases} \quad (s) \quad (10)$$

Dengan DC adalah konstanta *delay* waktu vertikal pada malam hari ($5ns = 5 \times 10^9$ s), dan F adalah faktor kemiringan proyeksi yang didapat dengan persamaan:

$$F = 1,0 + 16,0 (0,53 - El)^3 \quad (11)$$

d. Linearisasi model *Klobuchar*

Pada tahap ini dilakukan penyusunan persamaan linearisasi untuk mendapatkan koefisien α_n dan β_n . Dimana pada tahap sebelumnya nilai koefisien *Klobuchar* dari file rinex navigasi dianggap sebagai *initial value*. Persamaan linearisasi yang digunakan mengadopsi dari paper *Klobuchar* 2008, persamaan tersebut dituliskan sebagai berikut:

$$T_{iono} = T_{iono}^0 + \sum_{n=0}^3 \frac{\partial T_{iono}}{\partial \alpha_n} \cdot d\alpha_n + \sum_{n=0}^3 \frac{\partial T_{iono}}{\partial \beta_n} \cdot d\beta_n \quad (12)$$

Persamaan diatas digunakan untuk menyusun matrik A (Matrik Jacobian) sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T_{iono}^1}{\partial \alpha_0} & \dots & \frac{\partial T_{iono}^1}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial T_{iono}^1}{\partial \beta_0} & \dots & \frac{\partial T_{iono}^1}{\partial \beta_3} \\ \frac{\partial T_{iono}^2}{\partial \alpha_0} & \dots & \frac{\partial T_{iono}^2}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial T_{iono}^2}{\partial \beta_0} & \dots & \frac{\partial T_{iono}^2}{\partial \beta_3} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial T_{iono}^k}{\partial \alpha_0} & \dots & \frac{\partial T_{iono}^k}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial T_{iono}^k}{\partial \beta_0} & \dots & \frac{\partial T_{iono}^k}{\partial \beta_3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Diasumsikan jumlah satelit yang diterima oleh *receiver* adalah k , dan variabel d didefinisikan sebagai $d = T_{iono}^0 - 1,546(L_1 - L_2)/C$, dimana C adalah cepat rambat cahaya ($C = 3 \times 10^8$ m/s). Berikut persamaan pengamatan:

$$[A] \begin{bmatrix} d\alpha_0 \\ d\alpha_1 \\ d\alpha_2 \\ d\alpha_3 \\ d\beta_0 \\ d\beta_1 \\ d\beta_2 \\ d\beta_3 \end{bmatrix} + \frac{1,546}{C} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N1 \\ N2 \\ \vdots \\ Nk \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d1 \\ d2 \\ \vdots \\ dk \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Selanjutnya dilakukan iterasi pada persamaan 14 untuk mendapatkan nilai $d\alpha$ dan $d\beta$ mendekati atau sama dengan nol.

2. Pengolahan RTKLIB

a. Pengolahan data GPS *single frequency*

Satu set data koefisien *Klobuchar* dari hasil iterasi dimasukkan ke file rinex navigasi menggantikan koefisien global.

b. Pengolahan data GPS *dual frequency*

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Perhitungan Koefisien *Klobuchar* lokal

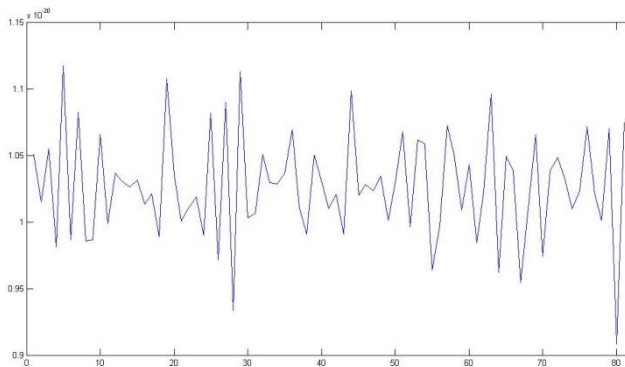
Berdasarkan pengolahan data navigasi dari pengamatan GPS *dual frequency* selama 24 jam didapatkan nilai sebagai berikut:

Tabel 1. Koefisien *Klobuchar* lokal

| Koefisien <i>Klobuchar</i> | Nilai asli (semicircle) | Nilai hasil perhitungan (semicircle) | Selisih |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------------------|----------|
| α_0 | 86020,00000 | 86020,05307 | -0,05307 |
| α_1 | 81920,00000 | 81921,22421 | -1,22421 |
| α_2 | -13110,00000 | -131099,85486 | -0,14514 |
| α_3 | -52430,00000 | -524299,99911 | -0,00089 |
| β_0 | 0,00000 | 0,00213 | -0,00213 |

| | | | |
|-----------|----------------------------|---------------------------|----------|
| β_1 | -8,88180x10 ⁻¹⁶ | 1,17053x10 ⁻¹⁶ | -2,1E-15 |
| β_2 | 589820 | 589823,99999 | 2,48E-09 |
| β_3 | 2001 | 2000,00009 | -1,9E-12 |

- Metode 3 : Menggunakan data *Single Frequency*, dengan koreksi bias ionosfer (Koefisien lokal).



Gambar 2 Grafik perubahan $d\alpha$ dan $d\beta$

Sesuai Tabel 1 diatas, dapat dilihat bahwa nilai delta yang didapat sangat kecil, sehingga hasil koefisien yang dihasilkan Tidak berbeda jauh dengan nilai aslinya. Koefisien yang memiliki selisih terbesar adalah koefisien β_2 yaitu 2,48E-09 dan koefisien yang memiliki selisih terkecil adalah koefisien α_1 yaitu -1,22421. Nilai diatas didapatkan melalui proses iterasi sebanyak 89 kali dengan parameter nilai terkecil adalah 10^{-21} .

Perubahan nilai $d\alpha$ dan $d\beta$ yang tidak teratur disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya adalah faktor lokasi titik pengamatan. Dalam penelitian ini lokasi titik pengamatan berdekatan dengan sebuah gedung yang tinggi, sehingga mempengaruhi jumlah satelit yang diterima oleh GPS dan dapat menyebabkan kesalahan *Multipath*.

2. Hasil Perhitungan Koordinat

Pengolahan koordinat dilakukan menggunakan perangkat lunak RTKLIB 2.4.2. Terdapat 4 macam metode yang diterapkan dalam pengolahan data ini, yaitu:

- Metode 1 : Menggunakan data *Dual Frequency*, dengan koreksi bias ionosfer (Kombinasi bebas ionosfer).
- Metode 2 : Menggunakan data *Single Frequency*, tanpa koreksi bias ionosfer.
- Metode 3 : Menggunakan data *Single Frequency*, dengan koreksi bias ionosfer (Koefisien global).

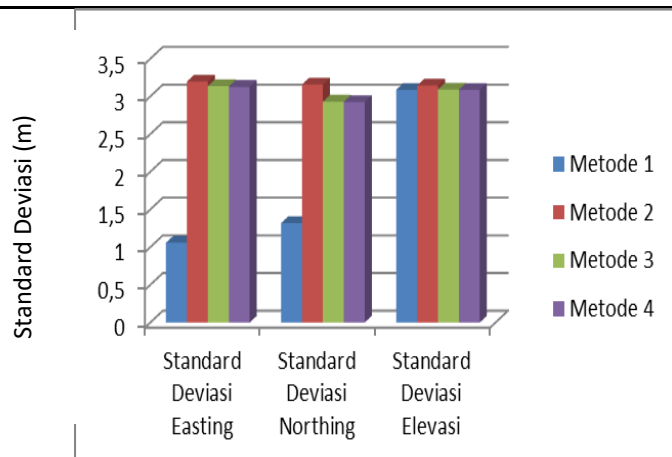
Dalam melakukan pengukuran GPS *dual frequency* menggunakan metode Diferensial, sedangkan pada pengukuran GPS *single frequency* menggunakan metode absolut. Hasil pengolahan yang diperoleh berupa *Latitude*, *Longitude*, dan *Elevation* serta standar deviasi titik pengamatan yang kemudian ditransformasikan menjadi koordinat UTM. Data koordinat dan standar deviasi hasil pengolahan data pengukuran dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Data Koordinat Geodetik

| Metode | Lintang | Bujur | Tinggi |
|--------|----------------|-----------------|------------|
| 1 | -7°16'47,4112" | 112°47'42,1912" | 40,22322 m |
| 2 | -7°16'47,4599" | 112°47'42,2294" | 45,65833 m |
| 3 | -7°16'47,4407" | 112°47'42,2283" | 40,48237 m |
| 4 | -7°16'47,4312" | 112°47'42,2199" | 40,42368 m |

Tabel 3. Data Koordinat UTM dan Standar Deviasi

| Metod | Easting (m) | Northing (m) | Std Dev. Easting (m) | Std Dev. Northin g (m) | Std Dev. Tinggi (m) |
|-------|---------------|----------------|----------------------|------------------------|---------------------|
| 1 | 698176,588867 | 9194922,526376 | 1,059 | 1,319 | 3,086 |
| 2 | 698177,753554 | 9194921,025299 | 3,198 | 3,159 | 3,144 |
| 3 | 698177,722771 | 9194921,616702 | 3,137 | 2,931 | 3,091 |
| 4 | 698177,468086 | 9194921,909704 | 3,127 | 2,926 | 3,087 |



Gambar 3. Grafik perbedaan standar deviasi pada setiap metode pengolahan

Standar deviasi dari masing-masing pengolahan kemudian dibandingkan untuk mengetahui standar deviasi dengan ketelitian yang lebih baik. Berdasarkan grafik 4.4 diketahui bahwa metode 1 menghasilkan data koordinat lebih baik dari

metode lainnya. Karena metode 1 menggunakan data GPS *dual frequency* dengan koreksi bias ionosfer (kombinasi bebas ionosfer), selanjutnya data hasil pengolahan metode 1 disebut koordinat yang dianggap benar. Sedangkan untuk data *single frequency*, metode 4 menghasilkan data koordinat lebih baik daripada metode 2 dan 3.

Analisis perubahan akurasi koordinat hasil pengolahan pada penelitian ini yaitu membandingkan *Mean error* masing-masing nilai koordinat hasil pengolahan data *single frequency* terkoreksi bias ionosfer (metode 3 dan 4) terhadap nilai koordinat tanpa koreksi bias ionosfer (metode 2). *Mean error* adalah rata-rata selisih nilai koordinat metode 2,3 dan 4 terhadap nilai koordinat yang dianggap benar, dimana koordinat yang dianggap benar adalah koordinat hasil pengolahan metode 1. Perubahan *Mean error* dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. *Mean error* terhadap metode 1

| Metode | Mean Error | | | |
|--------|------------|----------|---------|---------|
| | Easting | Northing | Elevasi | dr |
| 2 | 1,165 m | 1,501 m | 5,435 m | 5,757 m |
| 3 | 1,135 m | 0,910 m | 0,259 m | 1,477 m |
| 4 | 1,125 m | 0,897 m | 0,201 m | 1,092 m |

Tabel 5. Perubahan *Mean error* pada Metode 3 terhadap Metode 2

| Koordinat | Mean Error | | % perubahan Mean Error |
|-----------|------------|----------|------------------------|
| | Metode 2 | Metode 3 | |
| Easting | 1,165 m | 1,135 m | 2,625 % |
| Northing | 1,501 m | 0,910 m | 39,398 % |
| Elevasi | 5,435 m | 0,259 m | 95,232 % |
| dr | 5,757 m | 1,477 m | 74,35 % |

Tabel 6. Perubahan *Mean error* pada Metode 4 terhadap Metode 2

| Koordinat | Mean Error | | % perubahan Mean Error |
|-----------|------------|----------|------------------------|
| | Metode 2 | Metode 4 | |
| Easting | 1,165 m | 1,125 m | 3,469 % |
| Northing | 1,501 m | 0,897 m | 40,254 % |
| Elevasi | 5,435 m | 0,201 m | 96,312 % |
| dr | 5,757 m | 1,092 m | 81,026 % |

Berdasarkan tabel 5 dan 6 diketahui bahwa dengan koreksi bias ionosfer akan meningkatkan akurasi koordinat hasil pengamatan GPS *single*

frequency. Dimana setiap *Mean error* nilai koordinat mengalami penurunan, dimana semakin kecil kesalahan maka nilai akan mendekati nilai yang dianggap benar. Perubahan terbesar terjadi pada nilai Elevasi (Z), dengan menggunakan koefisien global perubahan *Mean error* mencapai 95,232 % dan menggunakan koefisien lokal sebesar 96,312%. Perubahan posisi (dr) didapatkan dari persamaan berikut.

$$dr = \sqrt{(X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2 + (Z_a - Z_b)^2} \quad (15)$$

Dimana posisi A (X_a, Y_a, Z_a) adalah posisi koordinat yang dianggap benar dan posisi B (X_b, Y_b, Z_b) adalah koordinat hasil metode 2,3 dan 4. Selanjutnya, melakukan analisis perubahan *Mean error* metode 4 terhadap metode 3.

Tabel 7. Perubahan *Mean error* pada Metode 4 terhadap Metode 3

| Koordinat | Mean Error | | % perubahan Mean Error |
|-----------|------------|----------|------------------------|
| | Metode 2 | Metode 4 | |
| Easting | 1,135 m | 1,125 m | 0,867 % |
| Northing | 0,910 m | 0,897 m | 1,412 % |
| Elevasi | 0,259 m | 0,201 m | 22,646 % |
| dr | 1,477 m | 1,092 m | 26,015 % |

Berdasarkan tabel diatas diketahui bahwa dengan menggunakan metode 4 meningkatkan akurasi pada masing masing nilai koordinat. Perubahan *Mean error* pada nilai *Easting* dan *Northing* tidak terlalu signifikan, karena koefisien *Klobuchar* yang dihasilkan memiliki selisih yang kecil.

Koefisien *Klobuchar* berpengaruh terhadap nilai *Delay ionosphere*, dimana nilai *Delay ionosfer* mempengaruhi jarak pseudorange dan jarak fase. Secara keseluruhan metode 4 (koreksi ionosfer menggunakan koefisien lokal) menghasilkan kenaikan akurasi lebih baik daripada metode 3 (koreksi ionosfer menggunakan koefisien global). Dengan nilai kenaikan akurasi sebesar 26,015%.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai Koreksi bias ionosfer menggunakan model *Klobuchar*, maka

didapatkan beberapa kesimpulan akhir yaitu:

1. Berdasarkan hasil pengolahan koefisien *Klobuchar*, koefisien yang dihasilkan tidak berbeda jauh dengan nilai awal. Koefisien yang memiliki selisih terbesar adalah koefisien yang memiliki selisih terbesar adalah koefisien β_2 yaitu $2,48 \times 10^9$ dan koefisien yang memiliki selisih terkecil adalah koefisien α_1 yaitu -1,22421. Nilai diatas didapatkan melalui proses iterasi sebanyak 89 kali dengan parameter nilai terkecil adalah 10^{-21} .
2. Dengan menggunakan koreksi bias ionosfer menggunakan koefisien lokal akurasi koordinat meningkat sebesar 26,015% terhadap penggunaan koefisien global.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis R.W.R mengucapkan terima kasih kepada Bapak Mokhamad Nur Cahyadi, ST, MSc. Ph.D dan Bapak Dr. Buldan Muslim, MSc. Selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dalam penelitian ini sehingga dapat berjalan dengan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- Dutt, Dr VBS., Gowsuddin, S. (2013). "Ionospheric Delay Estimation Using Klobuchar Algorithm for Single Frequency GPS Receivers". *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering* 2, 2:201-207.
- Klobuchar, J. A. (1987). "Ionospheric time-delay algorithm for single frequency GPS user". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 23, 3:325-331.
- Komjathy, A., Wilson, B.D., Runge, T.F., Boulat, B.M., Mannucci, A.J., Sparks, L., Reyes, M.J. (2002). "A New Ionospheric Model for Wide Area Differential GPS: The Multiple Shell Approach," *Proceedings of the 2002 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, CA, pp. 460-466
- Lee, C.-M., Park, K.-D., Ha, J., Lee, S. (2010). "Generation of Klobuchar Coefficient for Ionospheric Error Simulation". *Journal of Astronomy and Space Science* 27, 2:117-122.
- Yuan Y, Huo X, Ou J, Zhang K, Chai Y. (2008). "Refining the Klobuchar ionospheric coefficients based on GPS observations". *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, AES-44, 1498-1510.